MÉTODOS DE PROSPECCIÓN GEOFÍSICA: INVESTIGACIÓN EN TRABAJOS DE PATOLOGÍA

Sánchez Sánchez, A.[1*]; Ruiz Izquierdo, A.[1]; Sánchez Urios, J.[1]

[1] *Basalto Informes Técnicos, S.L.*

almudena@basaltoit.com

Resumen

En esta comunicación se destacan las aplicaciones de los métodos geofísicos para el estudio de patologías. Concretamente, se desarrollan los fundamentos técnicos de la tomografía eléctrica y el georadar GPR (Ground Penetrating Radar), por considerarse los más adecuados para este tipo de estudios, dentro de los métodos geofísicos electromagnéticos. Dentro de la tomografía eléctrica se diferencian el método galvánico y el método capacitivo mediante equipo OhmMapper, que no requiere clavar electrodos. Entre las ventajas de estas técnicas cabe destacar su carácter poco o nada invasivo, lo que permite realizar ensayos en zonas edificadas sin provocar daños.

Entre las principales aplicaciones de la tomografía eléctrica en el campo del estudio de patologías está la posibilidad de localizar zonas afectadas por humedad en el subsuelo, así como espesores de rellenos o zonas descomprimidas. De igual forma, el georadar permite determinar el tipo de cimentación existente, así como irregularidades en la misma, zonas afectada por humedad y elementos característicos en el subsuelo.

Se analizan dos casos reales en los que se ha llevado a cabo una campaña de investigación mediante técnicas geofísicas para el estudio de las patologías observadas en dos edificaciones. La investigación, en ambos casos, ha sido realizada por la empresa Basalto Informes Técnicos, S.L.

En estos casos, se ha utilizado una combinación de tomografía eléctrica (ya sea por el método galvánico o capacitivo) y georadar, lo que ha permitido establecer las causas de las patologías y localizar las zonas del subsuelo más afectadas por anomalías. La experiencia adquirida por Basalto Informes Técnicos, S.L. a lo largo de los últimos años, en el estudio de patologías mediante métodos de prospección geofísica, permite consolidar la idoneidad del empleo combinado de este tipo de técnicas en este campo.

Palabras clave: *tomografía eléctrica; georadar; métodos geofísicos; patologías*.

1. Introducción

Los métodos geofísicos se han revelado como una técnica muy adecuada en el estudio de patologías.

Entre el amplio abanico de métodos de prospección geofísica existentes, los métodos electromagnéticos (tomografía eléctrica y georadar) son los que pueden ofrecer una mayor aplicación al análisis de alteraciones del terreno que pueden dar lugar a la aparición de patologías en la edificación.

Por nuestra experiencia de más de 18 años en el sector de la geotecnia, podemos señalar que las causas más frecuentes de patologías en la edificación están relacionadas con las variaciones en el contenido en humedad del subsuelo (ya sea por oscilaciones en el nivel freático, porque se haya producido un importante aporte de agua por efecto de pérdidas o roturas de conducciones o porque el terreno posea un cierto carácter expansivo que provoca cambios de volumen en función de las modificaciones en las condiciones de humedad del medio) o por el hecho de que la cimentación no esté empotrada en el terreno natural, sino en un relleno que no cumple las condiciones adecuadas para asegurar un adecuado sostenimiento de la estructura.

Todos estos factores, que pueden provocar la aparición de importantes patologías en la edificación, tienen un claro reflejo en propiedades determinadas físicas de los materiales (por ejemplo, en la conductividad/resistividad eléctrica), por lo que las técnicas electromagnéticas constituyen un método idóneo para detectar las variaciones de dichas propiedades.

Entre las ventajas que ofrece este tipo de métodos destaca el hecho de que se trata de técnicas muy poco o no destructivas (al contrario que calicatas o sondeos mecánicos), ya que existen dispositivos que se desplazan por todo tipo de superficies, sin necesidad de introducir ningún tipo de elementos en el terreno, como es el caso del equipo de tomografía eléctrica capacitiva OHM MAPPER, y el equipo de georadar GPR (Ground Penetrating Radar). En el caso del equipo de tomografía eléctrica galvánica es necesario clavar una serie de electrodos en el terreno para lo que se realizan perforaciones mediante un taladro de pequeño diámetro, por lo que las señales de la investigación son mínimas.

Otra de las ventajas que ofrecen estos métodos es que son capaces de aportar gran cantidad de información con una inversión económica reducida, ya que permiten obtener un registro continuo de datos del subsuelo a lo largo de todo el perfil analizado y no sólo datos puntuales, como ocurre con los ensayos mecánicos empleados tradicionalmente (sondeos mecánicos y ensayos de penetración dinámica).

2. Metodología

2.1. Equipos empleados en la investigación geofísica

A. Georadar

El georadar o Ground Penetrating Radar (GPR) es una técnica no destructiva empleada en investigaciones poco profundas del subsuelo, obteniéndose resultados muy buenos en la localización de objetos enterrados y cartografía del subsuelo.

Es un método de prospección geofísica que se basa en la emisión al terreno de pulsos electromagnéticos de escasa duración (1-20 ns) mediante una antena emisora apantallada de frecuencia variable (entre 25 MHz y 2 GHz) en función de la profundidad de investigación.

Existe una relación inversa entre la profundidad de investigación y la frecuencia de la antena. El hecho de que las antenas sean apantalladas permite un mejor control del ruido y de las reflexiones desde el aire dirigiendo las ondas emitidas hacia el interior del subsuelo y evitando que éstas se disipen en todas las direcciones. De igual forma, las antenas apantalladas permiten una alta calidad de la imagen radar con un alcance en profundidad variable en función de su frecuencia (ver tabla 1).

Tabla 1. Profundidad de investigación con georadar GPR.

Antena	Profundidad (m)
100 MHz	15-20
500 MHz	5-6
800 MHz	1-2

Cuando la onda radiada al subsuelo halla heterogeneidades en las características electromagnéticas del terreno, como contactos litológicos, fracturas, huecos, elementos metálicos, estructuras enterradas, etc., parte de la energía se refleja a la superficie y parte se refracta hacia profundidades mayores. La señal reflejada es recibida por una antena receptora, similar a la antena emisora, en superficie, y debe ser amplificada, transformada al espectro de la audiofrecuencia y registrada.

La propagación de las ondas en el subsuelo está determinada por las propiedades electromagnéticas características de los materiales: conductividad, permitividad dieléctrica y permeabilidad magnética, de manera que las reflexiones de las ondas se producen debido a los contrastes de dichas propiedades.

Como se ha dicho anteriormente, el georadar es un método no invasivo que no requiere de la realización de ningún tipo de excavación. No se necesita establecer contacto físico entre los electrodos y el medio a auscultar, por lo que se puede aplicar fácilmente a cualquier tipo de ambiente.

El equipo de georadar está formado fundamentalmente por:

- Unidad central. Controla los tiempos de envío de señales eléctricas que son convertidas en electromagnéticas por la antena emisora y recibe las señales reflejadas en forma de registros de radargramas.

- Antena emisora. Transforma los impulsos eléctricos que recibe de la unidad central en ondas electromagnéticas de corta duración que se emiten hacia el medio que se quiere estudiar.

- Antena receptora. Capta la energía reflejada y transformada en pulsos eléctricos que envía a la unidad central.

- Ordenador portátil. Incorpora un software de registro de la señal electromagnética que per- mite la visualización del perfil de georadar en tiempo real.

- Odómetro. Rueda conectada a la antena.

Figura 1. Dispositivo de georadar de la empresa MALA GEOSCIENCE, con antena de 800 MHz.

El procedimiento operativo consiste en un barrido sistemático de la superficie a lo largo de una línea. Durante el desplazamiento se emiten gran cantidad de pulsos por segundo (entre 1 y 100 pulsos), de manera que se obtiene un perfil, que se puede considerar continuo por la cantidad de trazas que se obtienen, en el que se indica el tiempo total de viaje de una señal al pasar a través del subsuelo, reflejarse en una heterogeneidad y volver a la superficie, medido en nanosegundos. Este gráfico distancia/tiempo se conoce como radargrama.

Los registros que se obtienen son similares a los obtenidos cuando se realizan estudios de sísmica de reflexión, con la diferencia de que, en el caso del georadar, se trabaja con frecuencias mucho más altas y la emisión de pulsos se puede realizar muy rápidamente. Además, este método permite realizar un primer visionado de los registros en tiempo real, lo que permite al técnico identificar elementos característicos del subsuelo y adoptar decisiones sobre la marcha, a medida que avanza la investigación.

La selección de la frecuencia de las antenas, para un estudio determinado, es función del compromiso entre la resolución y la penetración. Las frecuencias elevadas son más resolutivas a poca profundidad, mientras que las de baja frecuencia son más penetrativas y tienen menor resolución.

En los radargramas que se obtienen a partir de los datos en crudo es muy o directamente imposible identificar las señales correspondientes a los objetos y estratos enterrados. Ello ocurre como consecuencia de, por ejemplo, la existencia de reverberaciones o de un alto ruido de fondo, la atenuación de las señales con la profundidad, la interferencia entre señales, entre otros factores. El procesamiento de los datos tiene entonces como finalidad hacer visibles las respuestas que son de interés.

Para ello se aplican distintas técnicas cuyos objetivos principales son, disminuir o eliminar señales indeseables y corregir las escalas de los radargramas de modo que éstos resulten lo más representativos posible de las formas y posiciones de los elementos en el subsuelo.

Existen varios programas para el procesado de datos de georadar en el mercado: Groundvision2, de MALA Geoscience; Reflex2DQuick, de Sandmeier Scientific Software.

El equipo de georadar, Ground Penetrating Radar, se emplea en ingeniería civil, medio ambiente, geología, exploraciones mineras y arqueología, entre otras, destacando su uso en la detección de elementos enterrados, tuberías, cables, localización de cavidades, inspección de suelos industriales y urbanos, inspección de puentes, muros y pavimentos, análisis de condiciones de fracturación del subsuelo, determinación de espesores de relleno, delimitación de zonas saturadas y plumas de contaminantes, etc.

Este equipo proporciona un valor añadido importante a nivel económico y mitigación de riesgos, puesto que al realizar una excavación o abrir una zanja, si no se conoce lo que está por debajo, se corre el riesgo de romper una tubería de agua, gas, luz, etc. que puede ocasionar corte de servicios a una comunidad y luego la reparación resultaría mucho más costosa que haber realizado previamente el estudio.

Fotografía 1. Equipo de georadar durante una campaña de prospección en unas pistas de atletismo (propiedad de Basalto Informes Técnicos, S.L.).

Fotografía 2. Equipo de georádar durante una campaña realizada en el Hospital San Pau, en Barcelona (propiedad de Basalto Informes Técnicos, S.L.).

B. Tomografía eléctrica. Método galvánico multielectródico y Método de Acoplamiento Capacitivo (equipo OhmMapper)

La tomografía eléctrica es una técnica geofísica no invasiva que tiene por objetivo específico la distribución real de la resistividad del subsuelo mediante la medida de las resistividades de los materiales geológicos subsuperficiales para determinar su espesor y profundidad (Telford et al., 1990; Reynolds, 1997, entre otros).

La resistividad es un parámetro intrínseco del terreno que depende de la porosidad efectiva, el nivel de saturación en agua, el grado de litificación y la composición mineralógica.

Las medidas obtenidas en el campo se corresponden con valores de resistividad aparente que, una vez volcadas a un ordenador, se tienen que procesar mediante programas de inversión de datos, para obtener las resistividades reales del subsuelo.

El resultado final, después de procesar los datos, es una imagen bidimensional (distancia-profundidad) que muestra la resistividad real del subsuelo, lo que permite determinar la geometría y espesores de las distintas unidades geoeléctricas y que puede ser interpretado como si se tratara de un perfil geológico.

La resistividad eléctrica, en ausencia de contenido metálico en los sedimentos, depende de la porosidad. Este parámetro es el que más influye en la característica eléctrica de una roca. Por lo tanto, existe una relación directa entre el volumen de poros, la resistividad eléctrica del agua de saturación en el terreno y la conductividad del material. También pueden influir en los valores de la resistividad eléctrica el contenido en arcilla y la permeabilidad de la misma roca.

La **tomografía eléctrica galvánica multielectródica** ha supuesto un salto cualitativo espectacular con respecto a los métodos de resistividad convencionales, técnicas que aunque se han estado utilizando durante varias décadas en estudios de filtración de agua, su limitada resolución 2-D les confería en general un papel secundario frente a otras técnicas (i.e. Potencial espontáneo).

Este avance se debe fundamentalmente dos razones:

- En primer lugar porque estos métodos convencionales solo utilizan 4 electrodos, siendo necesario para cada medida variar manualmente sus posiciones en el terreno (proceso relativamente lento y pesado). En cambio el método de Tomografía eléctrica es una técnica multielectródica, en el que todo el proceso de adquisición de datos está totalmente automatizado.
  Esto nos permitirá poder realizar un gran número de medidas, tanto en profundidad como lateralmente, en un breve espacio de tiempo (del orden de 500 medidas en una hora y media), obteniendo por tanto modelos 2-D de gran resolución.

- En segundo lugar porque el empleo de técnicas numéricas nos permitirá poder procesar eficazmente todo este gran volumen de información.

La tomografía eléctrica es especialmente útil en la localización de cavidades en el subsuelo, puesto que los huecos rellenos de aire presentan una resistividad mucho mayor que el material que los rodea (Reynolds, 1997).

Otra aplicación habitual es la determinación de agua en el subsuelo, debido al carácter poco resistivo de la misma cuando su contenido en iones es moderado o alto.

En la figura 3 se muestra el dispositivo de tomografía eléctrica galvánica Terrameter SAS 1000, de la marca ABBEM, indicándose los elementos integrantes de dicho equipo.

Fotografía 3. Equipo de tomografía eléctrica galvánica (propiedad de Basalto Informes Técnicos, S.L.).

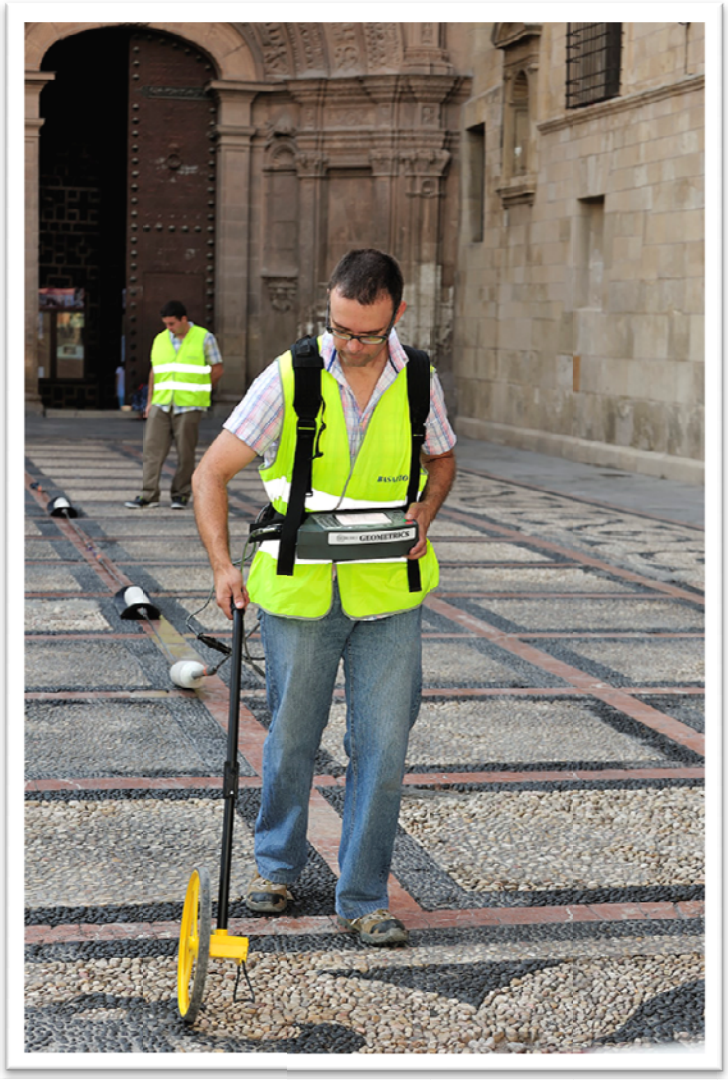
La **tomografía eléctrica mediante Acoplamiento Capacitivo** está especialmente indicada en aquellas zonas en las que el uso de un equipo de tomografía eléctrica galvánica tradicional resulta impracticable.

El equipo empleado para este tipo de tomografía es el denominado Ohmmapper de la empresa Geometrics.

El método capacitivo, mediante el equipo OhmMapper, a diferencia de la tomografía eléctrica por el método galvánico tradicional, permite atravesar niveles de elevada resistividad, como soleras de hormigón, capas asfálticas, o sustrato rocoso en afloramiento (calizas, granitos, diques de cuarzo, etc.) sin necesidad de clavar electrodos en la superficie.

El equipo OhmMapper emplea la configuración eléctrica dipolo-dipolo, que consiste en un emisor y receptor de la misma longitud (antenas de 2,5, 5, 10 m) separados por una cuerda no conductiva y realizando distintas pasadas (con separaciones progresivamente mayores) por perfil, de manera que a mayor distancia entre las antenas mayor profundidad de investigación. Al aumentar la profundidad de investigación se produce una disminución de la resolución.

El método de acoplamiento capacitivo con el equipo OhmMapper consiste en aplicar un impulso electromagnético de muy baja frecuencia, en torno a 17 kHz, a través de un transmisor al suelo, cuyo voltaje es captado a una distancia variable por el receptor, registrado y transformado a resistividades eléctricas tras la realización de una serie de correcciones.



Fotografía 4. Equipo Ohm Mapper (tomografía eléctrica capacitiva) durante una campaña de prospección realizada en la Catedral de Murcia (propiedad de Basalto Informes Técnicos, S.L.).

La fase de gabinete, una vez obtenidos los datos en campo, consiste en el volcado de datos desde el equipo OhmMapper a un ordenador y, posteriormente, se realiza el procesado de los mismos mediante un software específico, por ejemplo RES2DINV de Geotomo Software, obteniendo pseudosecciones de los valores de los diferentes perfiles realizados.

Con la inversión de datos se pasa de datos de resistividad aparente (registrados en campo) a datos de resistividad real y su potencia.

En los perfiles de tomografía eléctrica obtenidos se asigna una escala de color para los distintos intervalos de resistividad eléctrica. Habitualmente, para valores de resistividad eléctrica altos se usan los tonos rojos y amarillos, para los valores medios se utiliza el verde, y los valores de resistividad baja se muestran en tonos azules. Como ya se ha indicado, la distribución de los valores de resistividad a lo largo del perfil analizado nos permiten obtener cortes geoeléctricos del terreno, que se pueden interpretar en términos geológicos.

2.2. Metodología de trabajo

El paso previo, a la hora de afrontar el estudio de una edificación afectada por patologías, tiene que ser, en todos los casos, realizar una inspección detallada de la misma y sus alrededores, con el fin de analizar el tipo de patologías existentes y enmarcar la zona desde el punto de vista geológico y geomorfológico. Se procede a recopilar la información disponible de la zona que nos ayude a identificar las posibles causas de las patologías; tales como información geológica de la zona, serie histórica de fotografías aéreas, … Por supuesto, esta primera visita nos va a servir para planificar la campaña de investigación más adecuada al caso concreto.

Una vez en el lugar a investigar se dispone el equipo (o equipos en el caso de que se utilice una combinación de éstos para obtener la mayor información posible) en aquellas zonas que, generalmente, presentan los problemas más graves, procediendo a la toma de datos.

Tras la toma de datos, y tal como se ha descrito en los apartados anteriores, se procede al volcado de éstos y su procesado informático.

Finalmente, en gabinete, se considera en conjunto toda la información de que se dispone y se determina cuál (o cuáles) son las causas más probables que han producido las patologías estudiadas.

3. Casos reales estudiados

A continuación pasamos a exponer la metodología que se ha seguido en la investigación de varios casos reales de patologías mediante métodos de prospección geofísica. Los datos han sido cedidos por Basalto Informes Técnicos, S.L.

3.1. Caso nº 1: Vivienda con patologías en La Ñora (Murcia)

En este caso concreto se trata de una vivienda unifamiliar aislada que consta de planta baja y una altura y presenta una serie de patologías (grietas) en algunos de los muros del ala SO. Así mismo, se han observado grietas concéntricas en el suelo en esta misma zona (ver fotografía nº 5).

Fotografía 5. Detalle de las patologías observadas (caso nº 1).

Se sospecha que las causas de las patologías podrían estar relacionada con un excesivo aporte de agua al subsuelo debido al intenso riego de la zona ajardinada que rodea a la vivienda, aunque en superficie no se han observado indicios de humedad.

La investigación geofísica realizada consistió en un perfil de tomografía eléctrica mediante método galvánico multielectródico, en dirección NO-SE, con un equiespaciado de electrodos de 2.50 m y longitud total de 20 m, abarcando la zona más afectada por las patologías.

En las figuras 5 y 6 se muestran la distribución de los trabajos y el perfil de tomografía eléctrica realizado, respectivamente.

Figura 2. Plano de situación de la investigación (caso nº 1).

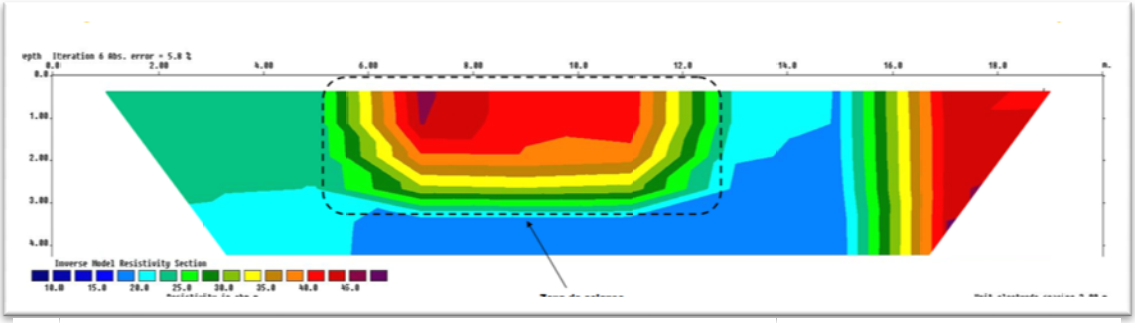


Figura 3. Perfil de tomografía eléctrica (caso nº 1).

Desde el punto de vista geológico, el edificio investigado está situado sobre conglomerados de edad Mioceno superior, correspondientes al término T(c11-c12)^(c3-Bc) de la Hoja Geológica nº 933 de Alcantarilla, a escala 1:50.000, editada por el IGME.

Una vez analizados los resultados obtenidos, se han obtenido las siguientes conclusiones:

- En el perfil de tomografía eléctrica TE-1 aparece muy bien definida una zona entre los 5,0 y 13,0 m desde el origen de éste (0,0) y hasta una profundidad en torno a 2,50-2,70 m, con forma de concavidad, donde se registran valores de resistividad mayores que los del entorno (en tonos rojos y amarillos), lo que puede ser indicativo de una mayor densidad de huecos.

- Dentro de esta zona se registra una anomalía de muy alta resistividad, a unos 7,0 m desde el origen del perfil, y que coincide con la posición donde aparecen las patologías más graves.

- Por debajo de esta zona anómala se registran valores bajos de resistividad (tonos verdes y azules). Esto parece indicar que ese terreno podría presentar un grado de humedad mayor que el terreno que constituye la zona de la anomalía de alta resistividad.

A la vista de los resultados obtenidos se determinó que la causa más probable de las patologías observadas podría estar en un colapso ocurrido en esa zona, lo que habría provocado un asiento diferencial de los elementos de cimentación existentes en la misma. El origen de este hundimiento podría estar en un lavado de finos producido por un elevado aporte de agua al terreno (ya que el sustrato natural consiste en un conglomerado de gravas y arenas con matriz limo-arcillosa), con la consiguiente merma en sus propiedades geotécnicas, y sin que lleguen a presentarse signos de humedad en superficie.

3.2. Caso nº 2: Patologías en edificación situada en Caravaca de la Cruz

En este caso concreto se trata de una edificación (restaurante y salón de celebraciones) donde se han observado una serie de patologías consistentes en grietas en la solera exterior y basculamiento de uno de los pilares de sostenimiento de la pérgola del lado N.

Se sospecha que las patologías observadas podrían estar relacionadas con la existencia de rellenos no controlados, por lo que la cimentación podría estar empotrada en parte en el terreno natural y apoyada en parte sobre relleno, con un comportamiento geotécnico irregular que habría dado lugar a los asientos diferenciales ocurridos.

Figura 4. Plano de distribución de la investigación (caso nº 2).

La campaña de trabajos de campo consistió en:

- Dos perfiles de tomografía eléctrica sin electrodos (método de acoplamiento capacitivo) mediante equipo OhmMapper, por el exterior de la edificación, en aquellas zonas más afectadas por las patologías.

- Dos perfiles de georadar GPR (Ground Penetrating Radar) a lo largo de las mismas direcciones de realización de los perfiles de tomografía eléctrica.

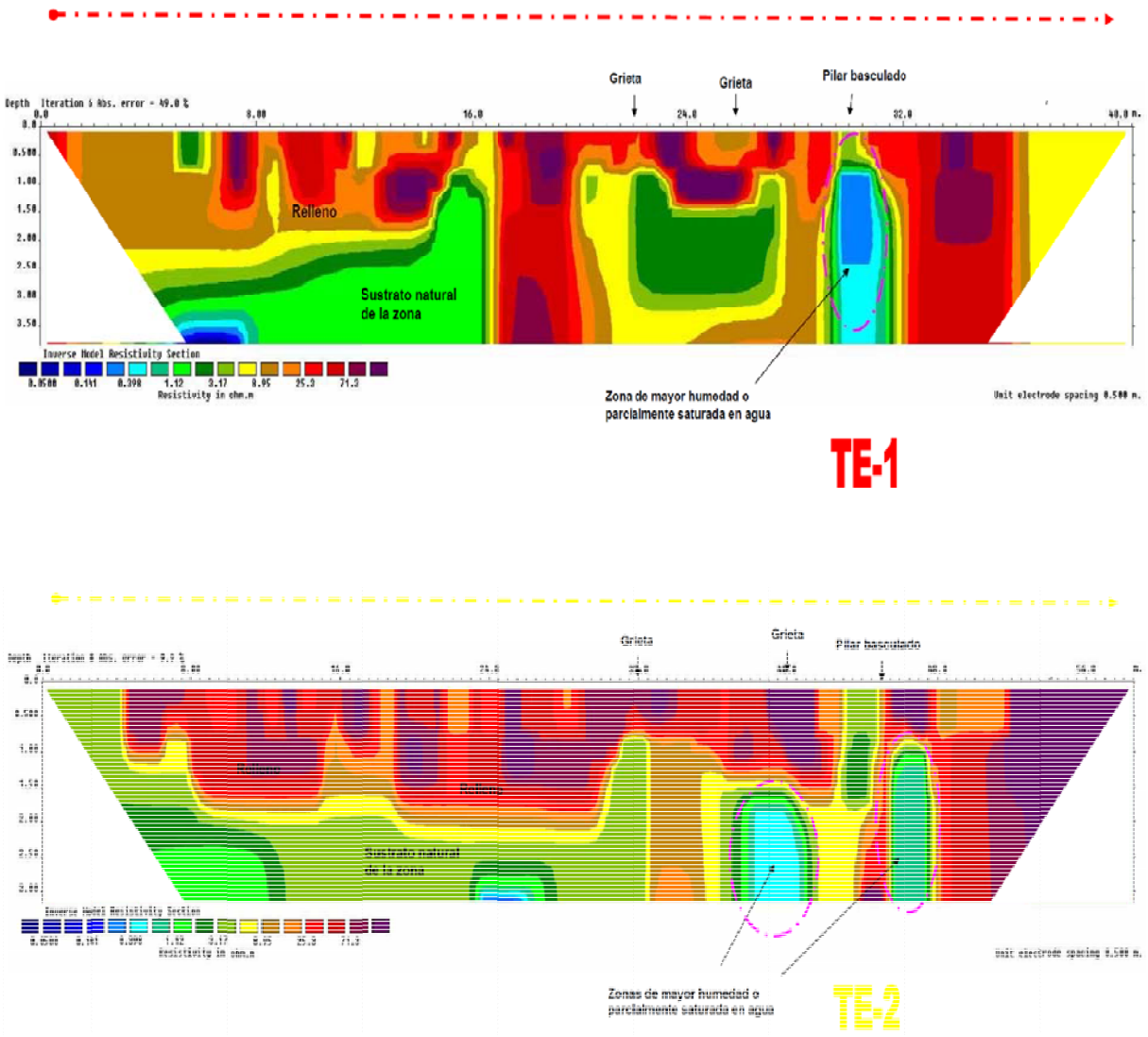


Figura 5. Perfiles de tomografía eléctrica (caso nº 2).

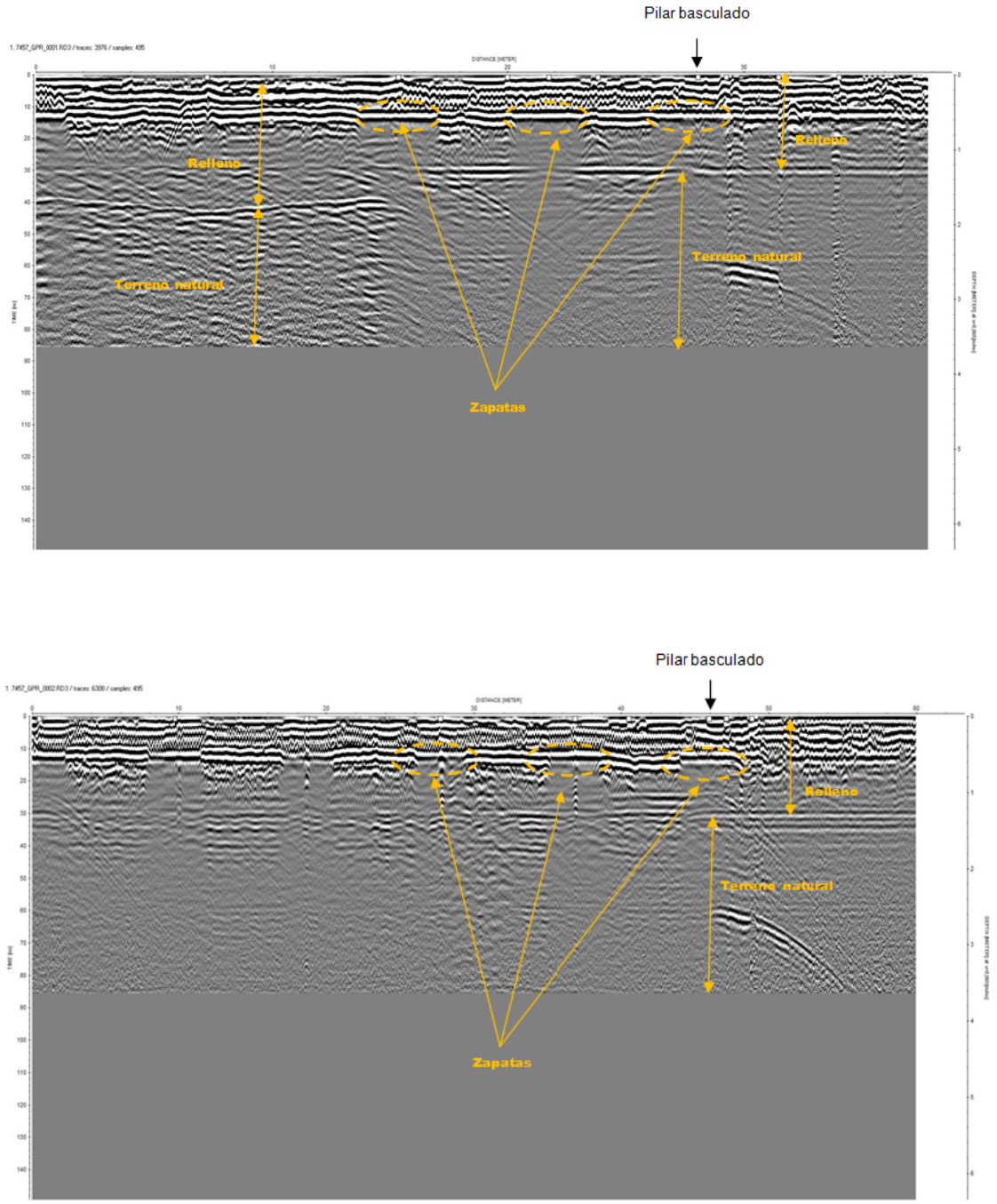


Figura 6. Radargramas (caso nº 2).

Una vez analizados los resultados obtenidos en la investigación realizada, se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- Ambos perfiles de tomografía eléctrica muestran la existencia de una zona, coincidente con el pilar que ha sufrido basculamiento, con un valor de resistividad eléctrica sensiblemente menor que el predominante en el entorno.

- Así mismo, en los perfiles de tomografía eléctrica han quedado muy bien reflejados los diferentes niveles: el correspondiente a la capa de relleno existente y el correspondiente al terreno natural de la zona.

- En los perfiles de georadar también se ha podido observar de manera muy nítida la separación entre el nivel correspondiente a la capa de relleno y el del terreno natural. Además se ha podido observar que el apoyo de la cimentación queda en el nivel de relleno.

- En el perfil de georadar nº 2 se observa que el mallazo que constituye la solera a lo largo de la línea investigada aparece muy alabeado e incluso inexistente en algunos puntos (como se puede observar en el punto del pilar basculado), lo que es indicativo de posibles movimientos internos del material de relleno subyacente.

A la vista de los resultados obtenidos y los puntos anteriormente indicados, se concluyó que las patologías observadas (grietas y basculamiento de pilares) se pudieron deber a una saturación local de agua del material bajo la cimentación, lo que ha provocado una modificación en las características geotécnicas de éste (por ejemplo, modificando los valores de cohesión efectiva del terreno), lo que daría lugar a asentamientos mayores de los previstos.

Este aporte de agua que ha permitido la saturación del terreno ha podido estar ligado a la rotura de una de las tuberías bajantes de desagüe, especialmente en el pilar afectado por el basculamiento y/o riego excesivo de la zona ajardinada perimetral al área afectada por las patologías.

4. Conclusiones

Como se ha podido ver en los ejemplos reales anteriormente expuestos, la utilización de métodos geofísicos para la detección de las causas de las patologías que pueden afectar a una edificación, utilizados como herramienta de diagnóstico previa a cualquier actuación mecánica o de remediación posterior, proporciona una información muy útil y valiosa, que en muchas ocasiones se refleja en una importante reducción en el costo económico de la solución de reparación, ya que, además de identificar la causa del problema, nos permite, sobre todo, localizarla, evitando de este modo, tener que realizar actuaciones extensas y "a ciegas".

Así mismo, el uso combinado de dos métodos geofísicos de diferente tipo se revela como una metodología de investigación sumamente eficaz debido al hecho de que se obtiene información complementaria entre ambos, lo que ayuda a definir y localizar de manera más efectiva la causa de la patología observada.

La experiencia adquirida por Basalto Informes Técnicos, S.L. a lo largo de los últimos años, en el estudio de patologías mediante métodos de prospección geofísica, permite consolidar la idoneidad del empleo combinado de este tipo de técnicas en este campo.

Bibliografía

GÓMEZ LÓPEZ, R. *Aplicación del radar de penetración en tierra (georadar) a la exploración no destructiva de yacimientos arqueológicos.* 2004.

MARTÍN GUTIÉRREZ, J. *Análisis del subsuelo utilizando técnicas geofísicas. Sistema Georadar RAMAC/GPR. VIII Congreso Nacional de Topografía y Cartografía.* 2004.

REYNOLDS, J.M. *An introduction to applied and environmental geophysics*. 1st Edition. John Wiley and Sons Ed., 1997. 796. ISBN 9780471955559

SASAKI, Y. *Resolution of resistivity tomography inferred from numerical simulation*. Geophysical Prospecting. 40: 453–463, 1992 . doi: 10.1111/j.1365-2478.1992.tb00536.x

ORELLANA, E. *Prospección geoeléctrica en corriente continua.* Madrid. 2ª ed. Paraninfo. 1982.